



PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **09326506 A**(43) Date of publication of application: **16.12.97**

(51) Int. Cl.

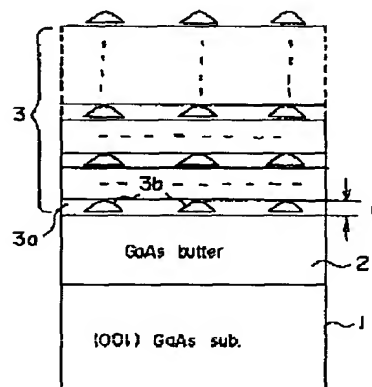
H01L 33/00
H01L 29/06
H01L 29/66
H01L 29/68
H01L 29/88
H01S 3/18

(21) Application number: **08212811**(22) Date of filing: **12.08.96**(30) Priority: **05.04.96 JP 08 84261**(71) Applicant: **FUJITSU LTD**(72) Inventor: **SUGIYAMA YOSHIHIRO**
NAKADA YOSHIAKI**(54) QUANTUM SEMICONDUCTOR DEVICE AND
MANUFACTURE THEREOF****(57) Abstract:**

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a quantum semiconductor device containing a quantum dot and showing a sharp energy spectrum corresponding to a quantum level.

SOLUTION: A heteroepitaxial structure, with which a distortion system is formed on a substrate 1, is repeatedly deposited on a substrate 1 pinching an intermediate layer 3a, and a bunch of quantum dots 3b, which are in alignment in a vertical direction, are formed. In that case, the thickness of the intermediate layer 3a is formed substantially smaller than the Bohr radius in such a manner that a single quantum dot 3b is vertically formed by quantum- mechanically coupling of the above-mentioned bunch of aligned quantum dots 3b.

COPYRIGHT: (C)1997,JPO



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-326506

(43)公開日 平成9年(1997)12月16日

(51)Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 L 33/00			H 0 1 L 33/00	A
29/06			29/06	
29/66			29/66	
29/68			29/68	
29/88			H 0 1 S 3/18	

審査請求 未請求 請求項の数32 O L (全 19 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号	特願平8-212811	(71)出願人	000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22)出願日	平成8年(1996)8月12日	(72)発明者	杉山 芳弘 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
(31)優先権主張番号	特願平8-84261	(72)発明者	中田 義昭 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
(32)優先日	平8(1996)4月5日	(74)代理人	弁理士 伊東 忠彦
(33)優先権主張国	日本 (J P)		

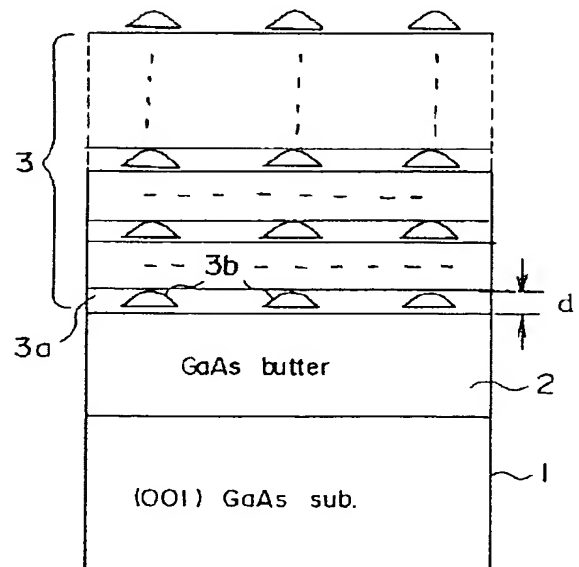
(54)【発明の名称】 量子半導体装置およびその製造方法

(57)【要約】

【課題】 量子ドットを含み、量子準位に対応して鋭いエネルギースペクトルを示す量子半導体装置を提供することにある。

【解決手段】 基板上に、基板に対して歪み系を形成するヘテロエピタキシャル構造を、中間層を挟みながら交互に繰り返し堆積し、垂直方向に整列した一連の量子ドットを形成し、その際、中間層の厚さを、前記整列した一連の量子ドットが、互いに量子力学的に結合し、実効的に単一の量子ドットが形成されるように、Bohr半径よりも実質的に小さくなるように設定する。

本発明の原理を示す図



1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子半導体装置において、

前記量子構造は：第 1 の格子定数を有する第 1 の半導体結晶よりなり、互いに繰り返し積層された複数の中間層と；各々の中間層中に形成され、前記第 1 の格子定数とは異なる第 2 の格子定数を有し、前記第 1 の半導体結晶に対して歪み系を形成する第 2 の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、

前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、前記複数の中間層の各々はキャリアの Bohr 半径以下の厚さに厚さを設定されていることを特徴とする量子半導体装置。

【請求項 2】 前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項 1 記載の量子半導体装置。

【請求項 3】 前記複数の量子ドットの各々は、直上の量子ドットと直接に接触していることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の量子半導体装置。

【請求項 4】 前記中間層の各々は、実質的に平坦な上主面を有することを特徴とする請求項 1～3 のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項 5】 前記複数の量子ドットの各々は InAs よりなり、前記複数の中間層の各々は GaAs よりなり、前記複数の中間層の各々は 3 nm 以下、1 nm 以上の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項 1～4 のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項 6】 前記複数の中間層の各々は、約 2～3 nm の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項 5 記載の量子半導体装置。

【請求項 7】 前記複数の量子ドットの各々は InAs よりなり、前記複数の中間層の各々は InP よりなり、前記複数の中間層の各々は 7.6 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項 1～4 のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項 8】 前記複数の量子ドットの各々は AlSb、InSb、GaSb より選ばれ、前記複数の中間層の各々は GaAs よりなり、前記複数の中間層の各々は 8.7 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項 1～4 のうち、いずれか請求項 1 記載の量子半導体装置。

【請求項 9】 前記複数の量子ドットの各々は GaInSb よりなり、前記複数の中間層の各々は GaSb よりなり、前記複数の中間層の各々は 4 分子層分以下の厚さを有することを特徴とする請求項 1～4 のうち、いずれ

2

か一項記載の量子半導体装置。

【請求項 10】 前記複数の量子ドットの各々は InP よりなり、前記複数の中間層の各々は InGaP よりなり、前記複数の中間層の各々は 5 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項 1～4 のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項 11】 前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットとアロイ化していることを特徴とする請求項 1～10 のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項 12】 半導体基板と；前記半導体基板上に形成された第 1 のクラッド層と；前記第 1 のクラッド層上に形成され、量子構造を含む活性層と；前記活性層上に形成された第 2 のクラッド層と；前記半導体基板上に形成され、前記第 1 のクラッド層を介して第 1 の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第 1 の電極と；前記第 2 のクラッド層上に形成され、前記第 2 のクラッド層を介して第 2 の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第 2 の電極とよりなる半導体発光装置において、

前記量子構造は：前記半導体基板と格子整合する第 1 の格子定数を有する第 1 の半導体結晶よりなり、互いに繰り返し積層された複数の中間層と；各々の中間層中に形成され、前記第 1 の格子定数とは異なる第 2 の格子定数を有し、前記第 1 の半導体結晶に対して歪み系を形成する第 2 の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、

前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、前記複数の中間層の各々はキャリアの Bohr 半径以下の厚さに厚さを設定されており、前記第 1 および第 2 のクラッド層は、いずれも前記中間層を構成する第 1 の半導体結晶と実質的に等しい格子定数の半導体結晶よりなることを特徴とする半導体発光装置。

【請求項 13】 前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項 12 記載の量子半導体装置。

【請求項 14】 前記複数の量子ドットの各々は、直上の量子ドットと直接に接触していることを特徴とする請求項 12 または 13 記載の量子半導体装置。

【請求項 15】 前記中間層の各々は、実質的に平坦な上主面を有することを特徴とする請求項 12～14 のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項 16】 前記複数の量子ドットの各々は InAs よりなり、前記複数の中間層の各々は GaAs よりなり、前記複数の中間層の各々は 3 nm 以下、1 nm 以上の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項 12～1

3

5のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項17】 前記複数の中間層の各々は、約2～3 nmの範囲の厚さを有することを特徴とする請求項16記載の量子半導体装置。

【請求項18】 前記複数の量子ドットの各々はInAsよりなり、前記複数の中間層の各々はInPよりなり、前記複数の中間層の各々は7.6 nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項19】 前記複数の量子ドットの各々はAlSb, InSb, GaSbより選ばれ、前記複数の中間層の各々はGaAsよりなり、前記複数の中間層の各々は8.7 nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか請求項1記載の量子半導体装置。

【請求項20】 前記複数の量子ドットの各々はGaInSbよりなり、前記複数の中間層の各々はGaSbよりなり、前記複数の中間層の各々は4分子層分以下の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項21】 前記複数の量子ドットの各々はInPよりなり、前記複数の中間層の各々はInGaPよりなり、前記複数の中間層の各々は5 nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項22】 前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットとアロイ化していることを特徴とする請求項12～21のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置。

【請求項23】 量子ドット構造を含む量子半導体装置の製造方法において、

(a) 半導体基板上に、前記半導体基板に対して歪み系を形成する量子ドットを、互いに孤立した成長島の形で、エピタキシャル成長する工程と；

(b) 前記半導体基板上に、前記量子ドットを覆うように、前記半導体基板に対して格子整合する半導体層を、中間層としてエピタキシャル成長する工程と；

(c) 前記中間層上に、前記半導体基板に対して歪み系を形成する量子ドットを、互いに孤立した成長島の形で、エピタキシャル成長する工程と；

(d) 前記工程(b)で形成された前記中間層上に、前記工程(c)で形成された量子ドットを覆うように、前記半導体基板に対して格子整合する半導体層を、次の中間層としてエピタキシャル成長する工程とを含み；前記工程(c)および工程(d)は、繰り返し、交互に実行され前記工程(b)および工程(d)において、前記中間層の厚さは、自由成長した状態における前記量子ドットの高さよりも実質的に小さく設定されることを特徴とする量子半導体装置の製造方法。

【請求項24】 前記工程(b)および(d)におい

4

て、前記中間層の堆積に伴い、前記量子ドットの高さが減少し、前記中間層の厚さに実質的に等しくなることを特徴とする請求項23記載の量子半導体装置の製造方法。

【請求項25】 前記量子ドットの各々はInAsよりなり、前記中間層の各々はGaAsよりなり、前記中間層の各々は3 nm以下、1 nm以上の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法。

10 【請求項26】 前記中間層の各々は、約2～3 nmの範囲の厚さを有することを特徴とする請求項25記載の量子半導体装置の製造方法。

【請求項27】 前記量子ドットの各々はInAsよりなり、前記中間層の各々はInPよりなり、前記複数の中間層の各々は7.6 nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法。

20 【請求項28】 前記量子ドットの各々はAlSb, InSb, GaSbより選ばれ、前記中間層の各々はGaAsよりなり、前記中間層の各々は8.7 nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法。

【請求項29】 前記量子ドットの各々はGaInSbよりなり、前記中間層の各々はGaSbよりなり、前記複数の中間層の各々は4分子層分以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法。

30 【請求項30】 前記量子ドットの各々はInPよりなり、前記中間層の各々はInGaPよりなり、前記複数の中間層の各々は5 nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法。

【請求項31】 さらに、前記複数の中間層の各々に形成された複数の量子ドットの各々を、隣接する中間層中の対応する量子ドットとアロイ化する熱処理工程を含むことを特徴とする請求項23～30のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置の製造方法。

40 【請求項32】 前記工程(c)および(d)は2～10回の範囲で繰り返されることを特徴とする請求項23～31のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は一般に半導体装置に係り、特に量子ドット構造を有する量子半導体装置およびその製造方法に関する。キャリアの閉じ込めのない、いわゆるバルク半導体結晶では、キャリアの状態密度はエネルギーと共に放物線的に、すなわち連続的に増大するが、半導体結晶中にキャリアを1次元的に閉じ込めたい

密度が階段状に変化する。かかる階段状の状態密度を有する系では、キャリアの分布はバルク結晶の場合よりも制限されるため、かかる量子井戸構造を例えばレーザダイオード等の光半導体装置に適用した場合、バルク半導体結晶を使った場合よりも幅のせまい鋭いスペクトルが得られ、またレーザダイオード等の発光素子では発光効率が向上する。また、量子井戸構造は、R H E Tのような共鳴バリアを有する電子素子において、キャリアのエネルギーフィルタとして使われている。

【0002】かかるキャリアの閉じ込めをさらに進めた量子細線構造では、キャリアの2次元的な閉じ込めの結果、状態密度は各階段の下端で最大になるように変化するため、キャリアのエネルギースペクトルはさらに鋭くなる。キャリアの閉じ込めをさらに進めた究極的な量子ドット構造では、キャリアの3次元的な閉じ込めの結果、状態密度は離散的になり、これに伴い、キャリアのエネルギースペクトルは、各量子準位に対応して完全に離散的になる。かかる離散的なエネルギースペクトルを有する系では、系が室温等の熱的励起が存在するような状態であってもキャリアの遷移が量子準位間で不連続に生じるため、例えば量子ドット構造を有する光半導体装置では、室温においても非常に鋭い発光スペクトルを得ることができる。また、かかる量子ドット構造をR H E Tのような共鳴バリアを有する電子素子において、キャリアのエネルギーフィルタとして使った場合も、低温のみならず、室温においても非常に鋭いエネルギースペクトルが得られる。

【0003】また、かかる量子ドット構造は、エネルギー緩和のボトルネック問題等、基礎物理学的な興味も持たれている。

【0004】

【従来の技術】従来、量子井戸構造は、M B E法あるいはM O V P E法を使って一対のバリア層の間に非常に薄い量子井戸層を介在させることにより、比較的容易に、また確実に形成することが可能であった。また、量子細線構造については、階段構造を有するいわゆる傾斜半導体基板を使い、各階段の側縁に沿って厚さおよび幅の狭い半導体層を量子井戸層として成長させる方法、あるいは1次元量子井戸構造を電子ビームリソグラフィ等により形成する方法が提案されている。

【0005】そこで、量子ドット構造についても、このような傾斜基板の段差あるいはキंकを使って形成することが考えられるが、かかる基板表面の段差の制御は困難であり、またかかる量子ドット界面においては元素の混合が生じやすく、界面における組成の急峻な変化が困難である等の問題点が存在する。また、リソグラフィ等のパターンニングを使った場合、加工に伴う量子ドットへの実質的な損傷が避けられない。

【0006】これに対し、I n A s / G a A s等の歪み系ヘテロエピタキシャル構造において、ヘテロエピタキ

シャル成長の初期に出現するいわゆるS-K (Stranski-Krastanow) モード成長を利用することにより、基板上に相互に離間した島の形で量子ドット構造を形成することができることが知られている。例えば、G a A s基板上に、I n組成が0.5程度の格子定数が大きく異なるI n G a A s層を数分子層、M B E法により堆積することにより、直径が30~40nmのI n G a A sの島がG a A s基板上に形成されることが報告されている(Leonard, D., et al., Appl. Phys. Lett. 63, pp. 3203 - 3205, 1993)。また、A L E法を使って直径が15~20nm程度のI n G a A sの島を、G a A s基板上に、100nm程度の間隔で形成できることが報告されている(Mukai, K., et al., Jpn. J. Appl. Phys., 33, pp. L1710 - L1712, 1994)。さらに、M O V P E法によっても、同様な量子ドットを形成できることが知られている(Oshinowo, J., et al., Appl. Phys. Lett. 65, (11), pp. 1421 - 1423 (1994))。

【0007】かかる歪み系ヘテロエピタキシャル構造における量子ドットの形成は、ヘテロ界面に生じる歪みエネルギーに支配されるため、従来の量子ドット構造の形成に比べてはるかに簡単であり、また電子ビームリソグラフィ等によるパターンニングを行なうわけでもないので、形成された量子ドットが製造プロセスにより損傷を受けることもない。かかる量子ドットに対してはフォトルミネッセンス(P L)も測定されており、1.2eV付近において、かなり広がったP Lピークが生じるのが確認されている(Leonard, D., et al., op cit.)。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】かかる従来のS-Kモードを使った量子ドットでは、先にも説明したように、P L強度は比較的強いものの、そのスペクトル半値幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)が典型的には80~100meV程度の範囲に広がってしまう問題が生じるが、これは量子ドットの大きさの制御が十分にできていないためであると考えられる。また、かかる量子ドットのP L波長は1.1μm程度であり、光通信あるいは光情報処理で一般的に使われている1.3μm帯の波長よりも短波長側にずれているが、従来のS-Kモードの量子ドットでは、P L波長を必要に応じて設定することが困難であった。後ほど説明するように、量子ドットの大きさ自体は堆積温度を制御することである程度は制御することができるが、個々の量子ドットで大きさにかんがりのばらつきが生じるのは避けられない。かかる量子ドットの大きさのばらつきが、P Lスペクトルの拡がりに結びついているものと考えられる。また、かかる従来の量子ドット構造では、発光に関与しない量子ドットもかなり含まれていると考えられる。

【0009】最近になって、Farad 他(Farad, S. et al., Appl. Phys. Lett. 68(7), pp. 991 - 993, February 12, 1996)は、I n P基板上に格子整合して堆積され

たAlInAsバッファ層上のInAsよりなるS-Kモード量子ドットについて、1.5 μ m帯のPL波長を報告している。しかし、この報告においても、PLスペクトルのFWHMは110meV以上あり、個々の量子ドットの波長制御に実質的な課題が残っていることを示している。

【0010】このように、従来のS-Kモードの量子ドットでは、応用上重要な1.3 μ m帯あるいは1.5 μ m帯において鋭い発光ピークを得ることができず、実用的な光半導体装置を構成することができなかった。また、RHEETのような電子装置においても同様な問題が生じていた。すなわち、従来のS-Kモードの量子ドットをこのようなRHEETの共鳴トンネルバリアとして使った場合、得られるエネルギーフィルタの特性が悪く、所望の鋭い共鳴トンネル効果が得られない。

【0011】そこで、本発明は、前記の課題を解決した量子ドット構造を有する半導体装置およびその製造方法を提供することを概括的目的とする。本発明のより具体的な目的は、S-Kモードによりヘテロエピタキシャル構造上に形成される複数の量子ドットからなる量子半導体装置において、形成される量子準位を個々の量子ドットの大きさとは独立に設定できる量子半導体装置、およびかかる量子半導体装置の製造方法を提供することにある。

【0012】本発明の他の目的は、互いに量子力学的に結合し、全体として所定のエネルギーの離散的量子準位を形成する複数の量子ドットを含む量子半導体装置、およびかかる量子半導体装置の製造方法を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記の課題を、請求項1に記載したように、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量子構造を含む活性層とよりなる量子半導体装置において、前記量子構造は：第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり、互いに繰り返し積層された複数の中間層と；各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定されていることを特徴とする量子半導体装置により、または請求項2に記載したように、前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項1記載の量子半導体装置により、または請求項3に記載したように、前記複数の量子ド

ットの各々は、直上の量子ドットと直接に接触していることを特徴とする請求項1または2記載の量子半導体装置により、または請求項4に記載したように、前記中間層の各々は、実質的に平坦な上主面を有することを特徴とする請求項1～3のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項5に記載したように、前記複数の量子ドットの各々はInAsよりなり、前記複数の中間層の各々はGaAsよりなり、前記複数の中間層の各々は3nm以下、1nm以上の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項1～4のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項6に記載したように、前記複数の中間層の各々は、約2～3nmの範囲の厚さを有することを特徴とする請求項5記載の量子半導体装置により、または請求項7に記載したように、前記複数の量子ドットの各々はInAsよりなり、前記複数の中間層の各々はInPよりなり、前記複数の中間層の各々は7.6nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項1～4のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項8に記載したように、前記複数の量子ドットの各々はAlSb、InSb、GaSbより選ばれ、前記複数の中間層の各々はGaAsよりなり、前記複数の中間層の各々は8.7nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項1～4のうち、いずれか請求項1記載の量子半導体装置により、または請求項9に記載したように、前記複数の量子ドットの各々はGaInSbよりなり、前記複数の中間層の各々はGaSbよりなり、前記複数の中間層の各々は4分子層分以下の厚さを有することを特徴とする請求項1～4のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項10に記載したように、前記複数の量子ドットの各々はInPよりなり、前記複数の中間層の各々はInGaPよりなり、前記複数の中間層の各々は5nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項1～4のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項11に記載したように、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットとアロイ化していることを特徴とする請求項1～10のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項12に記載したように、半導体基板と；前記半導体基板上に形成された第1のクラッド層と；前記第1のクラッド層上に形成され、量子構造を含む活性層と；前記活性層上に形成された第2のクラッド層と；前記半導体基板上に形成され、前記第1のクラッド層を介して第1の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第1の電極と；前記第2のクラッド層上に形成され、前記第2のクラッド層を介して第2の導電型のキャリアを前記活性層に注入する第2の電極とよりなる半導体発光装置において、前記量子構造は：前記半導体基板と格子整合する第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり、互いに繰り返し積層された複数の中間層

と；各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに実質的に等しい高さを有する複数の量子ドットとを含み、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列し、前記複数の中間層の各々はキャリアの Bohr 半径以下の厚さに厚さを設定されており、前記第1および第2のクラッド層は、いずれも前記中間層を構成する第1の半導体結晶と実質的に等しい格子定数の半導体結晶よりなることを特徴とする半導体発光装置により、または請求項13に記載したように、前記複数の中間層の各々は、前記量子ドットが自由成長した場合に有する高さよりも実質的に小さい厚さを有することを特徴とする請求項12記載の量子半導体装置により、または請求項14に記載したように、前記複数の量子ドットの各々は、直上の量子ドットと直接に接触していることを特徴とする請求項12または13記載の量子半導体装置により、または請求項15に記載したように、前記中間層の各々は、実質的に平坦な上主面を有することを特徴とする請求項12～14のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項16に記載したように、前記複数の量子ドットの各々は InAs よりなり、前記複数の中間層の各々は GaAs よりなり、前記複数の中間層の各々は 3 nm 以下、1 nm 以上の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項17に記載したように、前記複数の中間層の各々は、約 2～3 nm の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項16記載の量子半導体装置により、または請求項18に記載したように、前記複数の量子ドットの各々は InAs よりなり、前記複数の中間層の各々は InP よりなり、前記複数の中間層の各々は 7.6 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項19に記載したように、前記複数の量子ドットの各々は AlSb, InSb, GaSb より選ばれ、前記複数の中間層の各々は GaAs よりなり、前記複数の中間層の各々は 8.7 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか請求項1記載の量子半導体装置により、または請求項20に記載したように、前記複数の量子ドットの各々は GaInSb よりなり、前記複数の中間層の各々は GaSb よりなり、前記複数の中間層の各々は 4 分子層分以下の厚さを有することを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項21に記載したように、前記複数の量子ドットの各々は InP よりなり、前記複数の中間層の各々は InGaP よりなり、前記複数の中間層の各々は 5 nm 以下の厚さを有す

ることを特徴とする請求項12～15のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項22に記載したように、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットとアロイ化していることを特徴とする請求項12～21のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置により、または請求項23に記載したように、量子ドット構造を含む量子半導体装置の製造方法において、

(a) 半導体基板上に、前記半導体基板に対して歪み系を形成する量子ドットを、互いに孤立した成長島の形で、エピタキシャル成長する工程と；

(b) 前記半導体基板上に、前記量子ドットを覆うように、前記半導体基板に対して格子整合する半導体層を、中間層としてエピタキシャル成長する工程と；

(c) 前記中間層上に、前記半導体基板に対して歪み系を形成する量子ドットを、互いに孤立した成長島の形で、エピタキシャル成長する工程と；

(d) 前記工程(b)で形成された前記中間層上に、前記工程(c)で形成された量子ドットを覆うように、前記半導体基板に対して格子整合する半導体層を、次の中間層としてエピタキシャル成長する工程とを含み；前記工程(c)および工程(d)は、繰り返し、交互に実行され前記工程(b)および工程(d)において、前記中間層の厚さは、自由成長した状態における前記量子ドットの高さよりも実質的に小さく設定されることを特徴とする量子半導体装置の製造方法により、または請求項24に記載したように、前記工程(b)および(d)において、前記中間層の堆積に伴い、前記量子ドットの高さが減少し、前記中間層の厚さに実質的に等しくなることを特徴とする請求項23記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項25に記載したように、前記量子ドットの各々は InAs よりなり、前記中間層の各々は GaAs よりなり、前記中間層の各々は 3 nm 以下、1 nm 以上の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項26に記載したように、前記中間層の各々は、約 2～3 nm の範囲の厚さを有することを特徴とする請求項25記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項27に記載したように、前記量子ドットの各々は InAs よりなり、前記中間層の各々は InP よりなり、前記複数の中間層の各々は 7.6 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項28に記載したように、前記量子ドットの各々は AlSb, InSb, GaSb より選ばれ、前記中間層の各々は GaAs よりなり、前記中間層の各々は 8.7 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項29に記載したように、前記量子ドットの各々は GaInSb よりなり、前記中間層の各々は GaSb よ

りなり、前記複数の中間層の各々は4分子層分以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項30に記載したように、前記量子ドットの各々はInPよりなり、前記中間層の各々はInGaPよりなり、前記複数の中間層の各々は5nm以下の厚さを有することを特徴とする請求項23または24記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項31に記載したように、さらに、前記複数の中間層の各々に形成された複数の量子ドットの各々を、隣接する中間層中の対応する量子ドットとアロイ化する熱処理工程を含むことを特徴とする請求項23〜30のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置の製造方法により、または請求項32に記載したように、前記工程(c)および(d)は2〜10回の範囲で繰り返されることを特徴とする請求項23〜31のうち、いずれか一項記載の量子半導体装置の製造方法により、解決する。

【0014】以下、本発明の原理を説明する。本発明の発明者は、先に、かかるS-Kモードの量子ドットが形成された量子ドット構造上に、前記量子ドットを埋め込むように、基板と格子整合する中間層を形成し、かかる中間層上にさらにS-Kモードで量子ドットを形成した場合、上層の量子ドットが下層の量子ドット上に整列する現象を発見した(Sugiyama, Y., et al., Jpn. J. Appl. Phys. 35, Part 1, No. 2B, pp. 365 - 369, February, 1996)。かかる量子ドットの整列は、下層の量子ドットを埋め込んだ中間層中に前記量子ドットに対応して歪みが蓄積され、上層の量子ドットを構成する半導体層をかかる中間層上に堆積する際に、中間層のうち、かかる歪みが蓄積された部分に上層の量子ドットを構成する原子が集まるために生じるものと考えられる。

【0015】図1は、かかる量子ドットが基板主面に対して垂直方向に整列した積層量子構造の例を概略的に示す。図1を参照するに、図示の積層量子構造3は、GaAs基板1の(100)面上に厚さ400nmで形成されたGaAsバッファ層2上に形成され、前記バッファ層2上に繰り返し積層されたGaAs中間層3aを含み、各々の中間層3a中には、InAsによる複数の量子ドット3bが、相互に離散して形成されている。

【0016】このようにしてGaAsバッファ層2上に堆積されたInAs層は、層2に対して7%程度異なる格子定数を有するため、歪み系ヘテロエピタキシャル構造を形成する。かかる歪み系ヘテロエピタキシャル構造においてInAs層のエピタキシャル層を成長させる場合には、先にも説明したように、成長の初期にS-KモードによるInAsの島状成長が生じ、その結果量子ドット3bを構成するInAsの島が多数、前記バッファ層2の表面に形成される。

【0017】図示の構造では、さらにGaAs中間層3aが島3bを埋めるようにさらに堆積され、島3bの形

成および中間層3aの堆積が繰り返される。各々の島3bは、典型的には20nm程度の径と5nm程度の高さを有し、バンドギャップの大きい中間層3aで囲まれることにより、キャリアを3次的に閉じ込める量子ドットを形成する。

【0018】本発明の発明者は、先に、かかる量子ドットを含む中間層3aを、図1に示すように繰り返し堆積することにより、量子ドット3bが基板1の主面に垂直な方向に整列する現象を発見した(Sugiyama, Y. et al., op cit.)。これは、先にも説明したように、中間層3aのうち、量子ドット3bを覆う部分には、格子不整合に伴う歪みが蓄積しており、従って第2層目、第3層目等の量子ドット3bを形成する際、下層の中間層3aのうち、かかる下層の量子ドット3bを覆う部分に選択的にInAsの島状成長が生じるためであると理解される。

【0019】一方、かかる積層量子構造では、図2に示すように、量子ドットの径が中間層の積層と共に増大する傾向が観察された。ただし、図2の例では、中間層3aおよび量子ドット3bは、いずれもMBE法により、約510°Cの温度で形成している。

【0020】図2を参照するに、本発明の発明者が先に行なった実験(Sugiyama, Y., et al., op cit.)におけるように、前記中間層3aの厚さdを10nmに設定した場合、次々に積層される量子ドット3bの径が積層が進むにつれて、単調に増大するのがわかる。これに対し、本発明者が新たに行なった、本発明の基礎となる実験では、前記中間層の厚さdを、自由成長した量子ドットの高さ(5nm)よりも薄い3nmに設定した場合、量子ドット3bの径は初めの5層程度までは、積層の繰り返しと共にわずかに増大するものの、それ以上積層しても径の増大は生じないことが発見された。また、中間層3aの厚さdを30nm程度まで増大させた場合にも、かかる量子ドット3bの径の増大の問題は生じない。

【0021】図3は、かかる下側の中間層3a上に形成される量子ドット3bの単位面積あたりの個数、ないし量子ドット密度と、積層数との関係を示す。かかる量子ドット密度は、中間層3a上に供給されるInおよびAsの量が一定に制御されている場合、個々の量子ドット3bの大きさが増大すると必然的に減少する。すなわち、図3に見られる傾向は、図2の関数と相補的になっていることがわかる。

【0022】図4は、中間層3aを10層積層した場合の、最上層の量子ドット3bの径と、中間層3aの厚さとの関係を示す。図4を参照するに、中間層3aの厚さを10nmとした場合、量子ドット3bの径の増大は最も著しくなるのがわかる。この場合、10層目において、量子ドット3bの径は45nm近くに達する。また、これに対応して、図5に示す最上層の10層目にお

ける量子ドット密度も、中間層3aの厚さを10nmとした場合に最低になるのがわかる。

【0023】一方、図4より、中間層3aの厚さを5nm以下、特に3nm以下にすると、量子ドットの径の増大は実質的に抑制されることがわかる。また、図5は、中間層3aの厚さを5nm以下、特に3nm以下にした場合、量子ドット密度の減少が抑止されることを示す。また、先に図2で示されたように、中間層3aの厚さを3nm以下にすると、積層を重ねても、量子ドット3bの径は、それ以上増大しない。

【0024】以上の結果は、図1に示す積層量子構造3において、中間層3aの厚さを3nm以下に設定することにより、下層の量子ドット3bに整列して確実に上層の量子ドット3bが形成されることを示す。このような場合、中間層3aの厚さはキャリアのBohr半径(GaAsでは12nm)よりも実質的に小さいため、下層の量子ドット3b中のキャリアの波動関数は上層の量子ドット3b中に進入し、またその逆も真で、下層の量子ドット3bと上層の量子ドット3bとの間に量子力学的な結合が形成される。換言すると、積層量子構造3中において、基板主面に対して略垂直方向に整列した一連の量子ドット3bは、全体に広がった波動関数を有し、互いに連結した、実効的に単一の量子ドットとして作用する。

【0025】一方、中間層3aの厚さが約10nmである場合、図3あるいは図5に示すように、量子ドット密度が下層と上層とで異なってしまう、下層の量子ドット3bと上層の量子ドット3bとが、完全には対応しなくなる。図6は、図1の積層量子構造3を示す平面TEM写真である。

【0026】図6よりわかるように、個々の量子ドット3bは略円形ないしディスク状に形成され、ほぼ一様な間隔で、互いに分散して形成されている。また、個々の量子ドット3bの大きさは余り大きくは変化していないように見える。図7(A)～(D)は、図1の積層量子構造3において、中間層3aの厚さdを3nmとした場合の、それぞれ1層目、3層目、5層目および10層目に形成された量子ドット3bのAFM(原子間力顕微鏡)像を示す。すなわち、図7(A)～(D)は図2において、厚さdを3nmに設定した場合に対応する。

【0027】図7(A)～(D)を参照するに、図7(A)に示す1層目の量子ドット3bは、図7(B)～(D)に示す3層目以降の量子ドット3bよりもわずかに小さく、またその数も多いが、量子ドット3bの大きさおよび密度は、3層目の積層以降はほとんど変化しないことがわかる。

【0028】これに対し、図8(A)～(D)は、中間層3aの厚さdを10nmとした場合の、それぞれ1層目、3層目、5層目および10層目に形成された量子ドット3bのAFM像を示す。すなわち、図8(A)～

(D)は、図2において、厚さdを10nmに設定した場合に対応する。

【0029】図8(A)～(D)よりわかるように、形成される量子ドット3bの大きさは、積層の進行と共に増大し、それに伴い量子ドットの密度は減少する。従って図8(D)に示す10層目の単一の量子ドットに対して、図8(A)に示す1層目では、複数の量子ドットが対応するような場合が生じ、これらの量子ドットが、中間層3aを隔てて量子力学的な結合を生じた場合、非常に複雑な構造が形成されることになる。

【0030】図9は、中間層3aの厚さを2nmとして量子ドット3bを5層積層した場合の積層量子構造3の詳細を示す断面TEM写真、また図10は、中間層3aの厚さを3nmとして量子ドット3bを5層積層した場合の積層量子構造3の詳細を示す断面TEM写真である。

【0031】中間層の厚さを、自由成長した量子ドットの高さよりも小さく設定した系では、量子ドットは中間層を突き抜けることが予測されるが、実際に得られた構造では、以上のTEM写真よりわかるように、中間層は平坦な上主面を維持していることが観察される。これは、中間層の堆積に伴って、量子ドットが変形し、高さが減少することを意味する。また、これに伴い、量子ドットの高さは中間層の厚さに実質的に等しくなる。さらに、このような構造では、量子ドットは、その直上の量子ドットと直接に接触している可能性がある。

【0032】また、図9、10よりわかるように、上層の量子ドット3bは、対応する下層の量子ドット3bに対して、一対一の関係で、上下に整列しているのがわかる。また、このように中間層3aの厚さを3nmあるいは2nmまで減少させても、上下に整列した量子ドット3bは互いに完全に融合することではなく、積層構造を保持することがわかる。また、このように中間層3aの厚さを量子ドット3bの高さに略等しく設定した系では、仮に量子ドット3bが直上の量子ドット3bと直接に接触せず、間に1～2原子層の中間層3aが存在しても、かかる中間層3aのうち量子ドット3bを覆う部分の結晶構造は、量子ドット3bの結晶構造に対応して著しく変形される。かかる結晶構造の変形の結果、中間層3aは通常の量子井戸層におけるようなクローニッチ・ベニ型のパテンシャルバリアは形成せず、これに伴い、前記垂直方向に整列した一連の量子ドット3bは、キャリアがパテンシャルバリアを通過するトンネル効果がなくとも、実効的に単一の量子ドットを形成するものと考えられる。また、このような中間層3aの結晶構造の著しい変形の結果、上層の量子ドット3bと下層の量子ドット3aの大きさが、先に見たように揃うものと考えられる。

【0033】図11は、図1の積層量子構造3において、中間層3aおよび量子ドット3bを5層積層した構

造について、77 Kでのフォトルミネッセンス (PL) スペクトルを測定した結果を示す。図11を参照するに、量子ドット3bを1層積層しただけの構造では、PLスペクトル強度は低く、また非常に広がっており、個々の量子ドット3bの大きさにかなりのばらつきがあることが示唆される。

【0034】これに対し、中間層3aおよび量子ドット3bを5層積層した場合には、PLスペクトル強度は非常に高くなり、また、ピーク波長もやや低エネルギー側にシフトする。これは、積層された複数の量子ドット3bが量子力学的に結合して実効的に単一の量子ドットを形成することを示唆するが、中間層3aの厚さを20 nmあるいは6 nm程度に設定した場合、PLピークの幅は

かなり広がってしまう。

【0035】一方、図11は、中間層3aの厚さを3 nmあるいは2 nmまで減少させると、PLピークがさらに大きく低エネルギー側にシフトし、またピーク幅が非常に狭くなることを示している。すなわち、このように中間層3aの厚さを、対応する量子ドット3bの高さに匹敵する程度、あるいはそれ以下に減少させることにより、上下に積層した量子ドット3b相互の量子力学的結合がさらに進行することが示唆される。

【0036】図12は、中間層3aの厚さを3 nmとした場合のPLスペクトルと、量子ドット3bの積層数との関係を示す。図12を参照するに、中間層3aの厚さを3 nmとした場合、3回の積層で、すでに非常に鋭いPLピークが、約1.13 eVのエネルギーにおいて得られるのがわかる。積層回数を増やして5回とした場合、PLピークはさらに高くなり、より低エネルギー側、すなわち長波長側にシフトする。これは、積層を繰り返すことにより互いに量子力学的に結合した複数の量子ドット3bにより形成される実効的に単一の量子ドットの大きさが、増大する結果であると考えられる。

【0037】図13は、図1に示す積層量子構造3において、量子ドット3bを5層積層した場合について、得られたPLピークの半値幅 (FWHM; Full Width at HalfMaximum) を、中間層3aの厚さdの関数として示す。図13よりわかるように、PLピークの半値幅は中間層3aの厚さを2~3 nm程度にした場合に最小になり、垂直に整列した量子ドット3b間に非常に効率の高い量子力学的結合が生じることが示される。一方、中間層3aの厚さをさらに薄くして1 nm程度にすると、前記半値幅は逆に増大することがわかる。

【0038】以上の結果をまとめると、図1に示す積層量子構造3において、中間層3aの厚さを量子ドット3bの高さに略等しくなるように設定することにより、垂直方向に整列した量子ドット3bの大きさが一様に揃い、また整列した量子ドット3b間に強い量子力学的な結合が形成される。このような場合、量子ドット3bの大きさは積層を繰り返しても実質的に変化せず、従って

かかる積層を繰り返すことにより、実効的に単一の、任意の大きさの量子ドットを形成することができる。

【0039】図14は、量子ドット3bを堆積する際の基板温度と得られる量子ドット3bの径との関係を示す。図14を参照するに、形成される量子ドット3bの径は、白丸で示すように基板温度と共に増大する傾向があり、またこれに伴って中間層上の量子ドット密度は基板温度と共に減少する。すなわち、量子ドット3bを形成する際の基板温度を制御することにより、量子ドット3bの大きさもある程度制御可能である。

【0040】

【発明の実施の形態】以下、本発明を好ましい実施例について、詳細に説明する。図15は、本発明の第1実施例による発光ダイオード20の構成を示す。図15を参照するに、発光ダイオード20は、(100)面で画成されたn⁺型GaAs基板21上に形成され、前記GaAs基板21上に典型的には400~500 nmの厚さで堆積されたn⁺型GaAsバッファ層22と、前記バッファ層22上に、典型的には300 nmの厚さで形成されたn⁺型AlGaAsよりなる下側クラッド層23と、前記クラッド層23上に典型的には100 nmの厚さに形成されたn型GaAsよりなる下側導波層24とを含む。さらに、導波層24上には、積層量子構造の一部を構成する非ドープGaAs層25が、20 nmの厚さに形成される。

【0041】層22~25は、例えばMBE法により、620°Cの基板温度で形成される。その際、堆積した層からのAsの離脱を防ぐため、堆積を行なう反応容器内のAs圧を 6×10^{-6} Torrに設定するのがよい。層25が形成された後、Gaの供給を遮断して基板温度を例えば510°Cまで下げる。さらに、前記510°Cの基板温度において前記反応容器中にInの分子ビームを導入し、1.8分子層分の非ドープInAs層を、前記GaAs層25上に堆積する。かかる堆積に引き続きさらに約30秒間のアニールを行うことにより、先にも説明したように、堆積されたInAsは、GaAs層25上において、径が約20 nm、高さが約5 nmの、相互に離間した成長島26bを形成する。図14参照。

【0042】このようにして第1層目のInAs島26bが形成された後、前記GaAs層25上には、前記InAs島26bを覆うように、厚さが2~3 nmの非ドープGaAsよりなる第1層目の中間層26aを堆積する。かかる堆積の結果、厚さが2~3 nmのGaAs層26a中に径が約20 nm、高さが約2~3 nmのInAs量子ドット26bが分散した量子構造が得られる。かかる中間層26aの堆積に伴い、先に自由成長していたInAs島26bは変形し、高さが中間層26aの厚さに実質的に等しい2~3 nmに減少する。

【0043】さらに、前記InAs島26bの形成と前記中間層26aの堆積を例えば4回繰り返し、InAs

島26bが上下に整列した積層量子構造26が、図1の積層量子構造3の場合と同様に得られる。かかる堆積の繰り返しの結果、積層量子構造26は、約20nmの厚さに形成される。積層量子構造26は、発光ダイオードの活性層を形成する。

【0044】このような、中間層26aの厚さが自由成長したInAs島26bの高さよりも小さい積層量子構造26では、量子ドット26bは、直上の別の量子ドット26bと直接に接している可能性がある。ただし、この場合でも、量子ドット26bと直上の別の量子ドット26bとが融合してしまうことはなく、積層量子構造26の積層構造は維持される。また、量子ドット26bと直上の別の量子ドット26bとの間に1〜数原子層のGaAsが介在している可能性もある。

【0045】図1の発光ダイオードでは、さらに前記積層量子構造26上に非ドープGaAs層27が堆積され、その上にp型GaAsよりなる上側導波層28およびp⁺型AlGaAsよりなる上側クラッド層29が、それぞれ120nmおよび300nmの厚さに形成され、さらに層29上にp⁺型GaAsよりなるキャップ層30が、50nmの厚さに形成される。層27〜30の形成も、MBE法により行なえばよい。

【0046】さらに、このようにして形成された積層半導体構造に対して、前記GaAsバッファ層22が露出するまでメサエッチングを行い、形成されたメサ構造上にSiN等の保護膜33を形成した後、バッファ層22上に電極31を、また前記キャップ層30上に電極32を形成する。

【0047】かかる構成の発光ダイオードでは、互いに量子力学的に結合した量子ドット26bが基板主面に垂直に整列し、77Kにおいて約1.1eVの波長の非常に鋭い発光スペクトルを生じる。図16は、本発明の第2実施例による端面発光型レーザダイオード40の構成を示す縦断面図である。ただし、図16中、先に説明した部分に対応する部分には同一の参照符号を付し、説明を省略する。またレーザダイオード40の横断面図は、図15のものと実質的に同じであるので省略する。

【0048】図16を参照するに、レーザダイオードの対向する端面には高反射率ミラーMおよび低反射率ミラーARが形成され、その結果、前記積層量子構造26はレーザダイオードの光共振器を形成する。すなわち、垂直に整列した量子ドット26bにより形成された光は前記光共振器を往復する際に誘導放出により増幅され、コヒーレント光となって前記低反射率ミラーARが設けられた端面から出射する。

【0049】また、図示は省略するが、前記クラッド層31と光導波層との間に回折格子を形成してもよい。この場合は、レーザダイオード40はいわゆるDFBレーザダイオードとなる。図17は、本発明の第3実施例による面発光型レーザダイオード50の構成を示す断面図

である。ただし、図16中、先に説明した部分に対応する部分には同一の参照符号を付し、説明を省略する。

【0050】面発光型レーザダイオード50では、電極32がリング状に形成され、露出したGaAsキャップ層30の表面には反射防止膜ARが形成される。また、GaAs層24およびGaAs層28の代わりに、GaAsとAlGaAsを交互に積層しミラーとして作用する層24'、28'が形成され、層24'と層28'との間に、垂直な光共振器が形成される。一般に、層28'の積層数は、層24'の積層数よりも少なくする。

【0051】かかる構成では、垂直に整列した量子ドット26bにより形成された光は、前記光共振器を基板に垂直な方向に往復する際に誘導放出により増幅され、コヒーレント光となって、前記反射防止膜ARが設けられたキャップ層30の上主面より出射する。

【0052】図18は、本発明の第4実施例によるRHET60の構成を示す。図18を参照するに、RHET60は、半絶縁性GaAs基板61の(100)面上に形成され、前記基板61上に形成された非ドープGaAsよりなるバッファ層62と、前記バッファ層62上に形成されたn型コレクタ層63と、前記コレクタ層63上に形成された非ドープAlGaAsよりなるバリア層64とを含み、コレクタ層63上にはコレクタ電極63Aが形成される。

【0053】コレクタ層64上には、n型GaAsよりなるベース層65が形成され、さらにベース層65上には、非ドープAlAsよりなるバリア層66₁を介して、図1に示したと同様な構成の積層量子構造66が、共鳴トンネルバリア構造として形成される。すなわち、積層量子構造66は、非ドープInAs成長島よりなる量子ドット66bと、前記量子ドットを覆う非ドープAlGaAs中間層66aとよりなる単位層を繰り返し積層した構造を有し、量子ドット66bは基板に略垂直な方向に整列する。

【0054】さらに積層量子構造66上には、非ドープAlAsよりなる別のバリア層66₂を介して、n⁺型InGaAs(In=0.05)よりなるエミッタ層67が形成され、さらにエミッタ層67上にはn⁺型GaAsよりなるキャップ層68が形成される。また、前記ベース層65の一部には、ベース電極65Aが、また前記キャップ層68にはエミッタ電極68Aが形成される。

【0055】かかる構成のRHETでは、垂直方向に整列した量子ドット66bが量子力学的に結合して実効的に単一の量子ドットを形成するため、非常に鋭い共鳴トンネル特性が得られ、従ってエミッタ層67からベース層65に注入され、さらにコレクタ層63に到達するキャリアの流れを、バリア層64が形成するポテンシャルバリアにより、高い精度でオンオフ制御することができ

【0056】以上の各実施例で説明した積層量子構造において、さらにアニール処理を施し、垂直に整列した量子ドットを実際に融合させてしまうことも可能である。図19は、図15の実施例において、このようなアニールを行なった場合に得られる本発明の第4実施例による発光ダイオード20'の構造を示す。かかる構造では、量子ドット26bが融合して物理的に単一の量子ドット26b'が形成されるが、かかる量子ドット26b'が共鳴するエネルギースペクトルはさらに鋭くなると考えられる。かかるアニールは、例えば800°Cで1分間行なえばよい。ただし、図19中、先に説明した部分には同一の参照符号を付し、説明は省略する。

【0057】図20は、本発明の第6実施例による共鳴トンネルダイオード70の構成を示す図である。図20を参照するに、共鳴トンネルダイオード70は、(100)面を有するn⁺型GaAs基板71上に構成され、基板71上には厚さが300nm、キャリア密度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn⁺型GaAsバッファ層72と、厚さが5nmの非ドープGaAsスペーサ層73と、厚さが2nmの非ドープAlAs層74とが、順次形成される。さらに、前記AlAs層74上には、SKモードにより形成された非ドープInAsよりなる高さが5nmの成長島75aを厚さが3nmの非ドープGaAs中間層75bで埋め込んだ構造を7層繰り返した積層量子構造75が形成される。先にも説明したように、中間層75bを堆積する際に、InAs成長島75aは変形し、高さが中間層75bの厚さに実質的に等しくなる。かかる積層量子構造75では、InAs島75aは垂直に整列し、量子力学的に結合することにより、より大きな量子ドット75Aを形成する。

【0058】このようにして形成された積層量子構造75上には、さらに厚さが2nmの非ドープAlAs層76を隔てて別の同様な積層量子構造77が形成される。さらに、前記積層量子構造77上には、厚さが2nmの別の非ドープAlAs層78および厚さが5nmの非ドープGaAsよりなるスペーサ層79が順次堆積され、さらにキャリア密度が $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のn⁺型GaAsよりなるコンタクト層80が、50nmの厚さに堆積される。

【0059】このようにして形成された半導体積層構造体は、さらにエッチングによりメサ構造が形成され、メサ構造最上部のコンタクト層80上には上部電極81が、また基部を形成するバッファ層72上には下部電極83が形成される。さらに、メサ構造の側壁部にはSiO₂絶縁膜82が保護膜として堆積される。

【0060】図21は、図20の共鳴トンネルダイオードの動作を説明する図である。図21を参照するに、図20に示したAlAs層74、76、78がポテンシャルバリアを形成し、量子ドット構造75、77の各々には、基底準位および高次の励起状態に対応する複数の量

子準位が形成されているのがわかる。

【0061】図21は、図20の構造中の電極81および82に直流電圧Vを印加した状態を示しており、これに伴って積層量子構造75の基底準位および積層量子構造77の1次励起準位がn⁺型GaAs層72のフェルミ準位E_fに一致しているのがわかる。かかる共鳴状態では、GaAs層72から供給される電子は、積層量子構造75および77をホットエレクトロンとして通過し、GaAs層80に到達する。これに対し、図21のバイアス状態を変化させると、共鳴状態は消失し、電子の通過は阻止される。

【0062】図22は、図20の共鳴トンネルダイオード70の動作特性を示す。図22を参照するに、かかる積層量子構造75、77は、量子ドット75Aにおけるキャリアの3次元閉じ込めに伴い、各量子準位においていわゆるδ関数的な鋭い状態密度を示し、量子準位を外れると、許容される状態が実質的にゼロになる。このため、共鳴トンネルダイオード70では、量子構造として図22に破線で示した特性を示す2次元のキャリア閉じ込めを行なう量子細線を使った場合に比べて、オフ時におけるリーク電流を実質的にゼロにすることが可能である。

【0063】図23Aは、積層量子構造75、77において、積層数を5、堆積温度を510°C、中間層75bの厚さを2nmとした場合のPLスペクトルを示す。ただし、PLスペクトルの測定は77°Kにおいて、Arレーザを照射しながら行なった。

【0064】図23Aよりわかるように、Arレーザの出力を増大させると、図21に示したエネルギー準位に対応して、エネルギー的に等間隔に並んだ複数のPLピークが出現することがわかる。図23Bは、積層量子構造75、77において、堆積温度を525°C、中間層の厚さを3nmとした場合のPLスペクトルを示す。

【0065】図23Bにおいても、図23Aと同様な複数のPLピークが観測されるが、ピーク間隔が図23Aの場合よりも狭まっていることがわかる。これは、堆積温度および中間層の厚さ、さらには積層数を変えることにより、形成される量子準位の間隔を制御することが可能であることを意味している。図20の実施例では、図21Bに示すように、量子準位間隔を縦光学(LO)フォノンのエネルギー $\hbar/2\pi \cdot \omega_{LO}$ に等しく設定してあるが、これは以下に図24を参照しながら説明するように、励起準位から基底準位への遷移を高速で行なうためである。

【0066】図24を参照するに、本発明の各実施例において使われる量子ドット構造では、先にも説明したように、δ関数的な非常に鋭い形状の状態密度が、量子準位に対応するエネルギーにおいて、離散的に出現する。このような3次元的なキャリアの閉じ込めが生じている系では、一の準位と隣接する準位の間に許容されるキャ

21

リアの状態が存在しないため、キャリアの遷移は生じにくい。これは、エネルギー緩和のボトルネック問題として知られている。

【0067】本発明では、量子半導体装置の動作速度を向上させるため、量子準位の間隔を、半導体結晶中におけるLOフォノンのエネルギーに等しく設定する。その結果、キャリアはLOフォノンを吸収あるいは放出することにより、容易に一の状態から他の状態に遷移することが可能になる。

【0068】以上の説明は、図20の共鳴トンネルダイオード70を例にして行なったが、先に説明した全ての実施例に対しても有効である。以上の各実施例では、GaAs層上に形成されたInAsの島により形成される量子ドットを考えたが、本発明は、かかる特定の材料の組み合わせに限定されるものではなく、歪みヘテロエピタキシャル系を形成する他の半導体材料の組み合わせを使うことも可能である。

【0069】例えば、図15の構成において、中間層26aをGaAsまたはAlGaAsとし、量子ドット26bをInAsまたはInGaAsとしてもよい。また、中間層26aをGaAs、AlGaAsまたはInGaPとし、量子ドット26bをInAs、InP、GaSbあるいはInGaSbとしてもよい。

【0070】前記量子ドット26bをInAsより構成し、前記中間層26aをInPより構成する場合、自由成長状態において量子ドット26bは7.6nmの高さを有し、従って、中間層26aは7.6nm以下の厚さ、例えば4分子層以下の厚さを有するのが好ましい。前記量子ドット26bをAlSb、InSb、GaSbのいずれかより形成し中間層26aをGaAsより形成する場合には、量子ドット26bは自由成長状態において8.7nmの高さを有し、従って中間層26aは8.7nm以下の厚さ、例えば4分子層以下の厚さを有するのが好ましい。さらに、前記量子ドット26bをGaNより形成し中間層26aをGaSbGaSbより形成する場合は、中間層26aは4分子層分以下の厚さを有するのが好ましい。また、量子ドット26bをInPより形成し、中間層26aをInGaPより形成する場合、前記量子ドット26bは自由成長状態において5nmの高さを有し、従って中間層26aは5nm以下の厚さ、例えば2分子層の厚さを有するのが好ましい。

【0071】また、以上に説明した各実施例において、中間層の組成は、基板との格子定数のずれが7%以下になるように設定するのが好ましい。以上、本発明を好ましい実施例について説明したが、本発明はかかる実施例に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載の要旨内において様々な変形・変更が可能である。

【0072】

【発明の効果】請求項1または12記載の特徴によれば、半導体基板と、前記半導体基板上に形成された、量

22

子構造を含む活性層とよりなる量子半導体装置あるいは半導体発光装置において、前記量子構造を第1の格子定数を有する第1の半導体結晶よりなり、互いに繰り返し積層された複数の中間層と、各々の中間層中に形成され、前記第1の格子定数とは異なる第2の格子定数を有し、前記第1の半導体結晶に対して歪み系を形成する第2の半導体結晶よりなり、各々前記中間層の厚さに対応する高さを有する複数の量子ドットとにより構成し、その際前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットは、隣接する中間層中の対応する量子ドットと、前記半導体基板の主面に垂直な方向に、実質的に整列させ、前記複数の中間層の各々はキャリアのBohr半径以下の厚さに厚さを設定することにより、前記整列した量子ドットが互いに量子力学的に結合し、実効的に単一の量子ドットを形成する。

【0073】請求項2〜10または13〜21記載の特徴によれば、前記複数の中間層の各々の厚さを、自由成長した場合の前記量子ドットの高さよりも小さく設定することにより、下層の量子ドットと上層の量子ドットとがほぼ1対1に対応し、前記整列した量子ドット間の量子力学的な結合が実質的に向上し、非常に鋭いエネルギースペクトルを特徴とする量子準位が実現される。

【0074】請求項11、22、31記載の本発明の特徴によれば、前記複数の中間層の各々において、各々の量子ドットを、隣接する中間層中の対応する量子ドットとアロイ化することにより、単に実効的に同一であるのみならず、実際にも単一の量子ドットが形成される。

【0075】請求項23〜32記載の本発明の特徴によれば、自由成長した量子ドット上に、かかる自由成長した量子ドットの高さよりも小さい厚さの中間層を堆積することにより、量子ドットが変形し、中間層の厚さに実質的に等しい高さを有するようになる。かかる構造を繰り返し形成することにより、下層の量子ドットと上層の量子ドットとが力学的および量子力学的に結合し、上下に整列し、単一の量子ドットとして作用する量子ドットの列が形成される。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理を示す図である。

【図2】図1の構成において、量子ドットの径と積層数との関係を示す図である。

【図3】図1の構成において、量子ドット密度と積層数との関係を示す図である。

【図4】図1の構成において、量子ドットの径と中間層の厚さとの関係を示す図である。

【図5】図1の構成において、量子ドット密度と中間層の厚さとの関係を示す図である。

【図6】本発明による量子ドットを示す平面TEM写真の図である。

【図7】(A)〜(D)は、中間層の厚さを3nmとした場合における積層の進行に伴う量子ドット径および密

度の変化を示すA F M写真の図である。

【図8】(A)～(D)は、中間層の厚さを10nmとした場合における積層の進行に伴う量子ドット径および密度の変化を示すA F M写真の図である。

【図9】中間層の厚さを2nmとした場合の量子ドットの整列状態を示す断面T E M写真の図である。

【図10】中間層の厚さを3nmとした場合の量子ドットの整列状態を示す断面T E M写真の図である。

【図11】垂直に整列した量子ドットのP Lスペクトルを示す図である。

【図12】垂直に整列した量子ドットのP Lスペクトルを示す別の図である。

【図13】中間層の厚さとP Lスペクトルの鋭さの関係を示す図である。

【図14】堆積温度と量子ドットサイズおよび密度の関係を示す図である。

【図15】本発明の第1実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図である。

【図16】本発明の第2実施例による端面発光型レーザダイオードの構成を示す断面図である。

【図17】本発明の第3実施例による面発光型レーザダイオードの構成を示す断面図である。

【図18】本発明の第4実施例によるR H E Tの構成を示す断面図である。

【図19】本発明の第5実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図である。

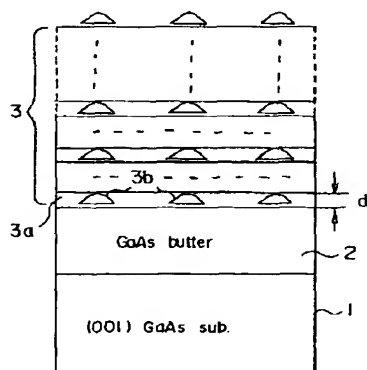
【図20】本発明の第6実施例による共鳴トンネルダイオードの構成を示す断面図である。

【図21】図19の共鳴トンネルダイオードの動作原理を説明するバンド構造図である。

【図22】図19の共鳴トンネルダイオードの動作特性を示す図である。

【図1】

本発明の原理を示す図



【図23】(A), (B) は堆積条件を変えて形成した積層量子構造のP Lスペクトルを示す図である。

【図24】本発明の積層量子構造における高次の励起状態、および、状態間の遷移を促進する構成を示す図である。

【符号の説明】

1, 21, 61, 71 基板

2, 22, 62, 72 バッファ層

3, 26, 66, 75, 77 積層量子構造

10 3a, 26a, 66a, 75b 中間層

3b, 26b, 26b', 66b, 75a, 75A 量子ドット

20 発光ダイオード

23, 29 クラッド層

24, 28 導波層

24', 28' 反射層

25, 27 非ドープ層

30, 68 キャップ層

31, 32, 81, 83 電極

20 33 保護膜

40 端面発光型レーザダイオード

50 面発光型レーザダイオード

60 R H E T

63 コレクタ層

63A コレクタ電極

64 バリア層

65 ベース層

65A ベース電極

661, 662 共鳴トンネルバリア層

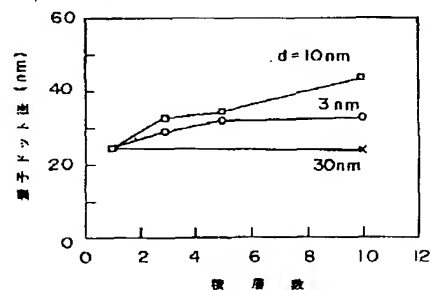
30 67 エミッタ層

68A エミッタ電極

70 共鳴トンネルダイオード

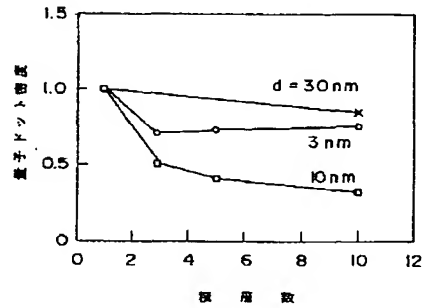
【図2】

図1の構成において、量子ドットの径と積層数との関係を示す図



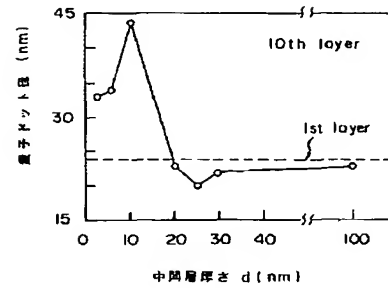
【図3】

図1の構成において、量子ドット密度と積層数との関係を示す図



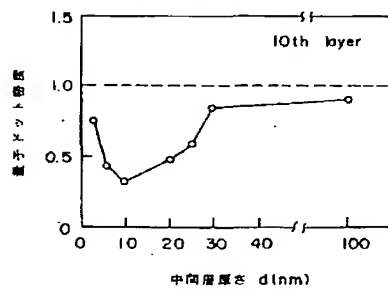
【図4】

図1の構成において、量子ドットの径と中間層の厚さとの関係を示す図



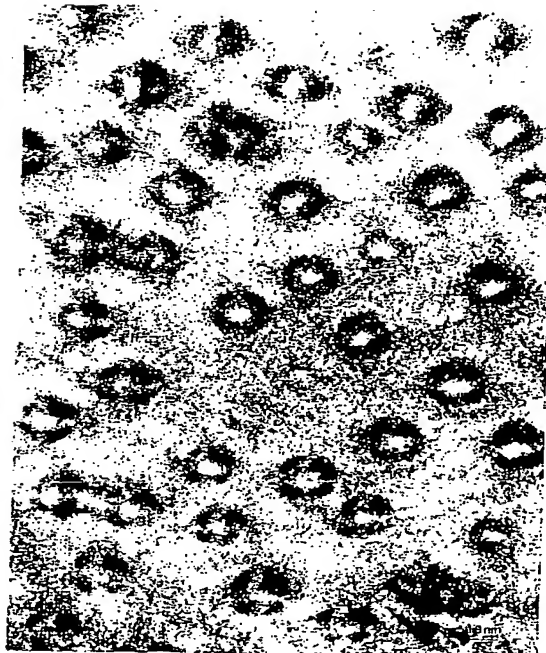
【図5】

図1の構成において、量子ドット密度と中間層の厚さとの関係を示す図



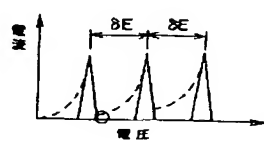
【図6】

本発明による量子ドットを示す平面TEM写真の図



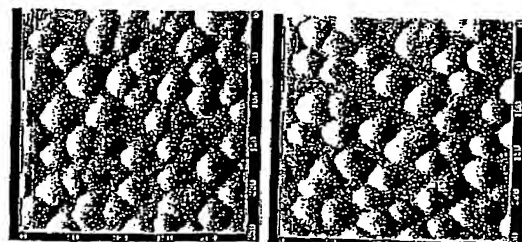
【図22】

図19の共振トンネルダイオードの動作特性を示す図



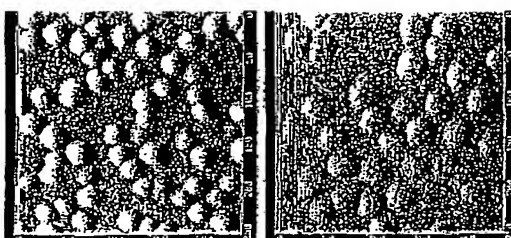
【図7】

中間層の厚さを3nmとした場合における積層の進行に伴う
量子ドット径および密度の変化を示すAFM写真の図



(C)

(D)

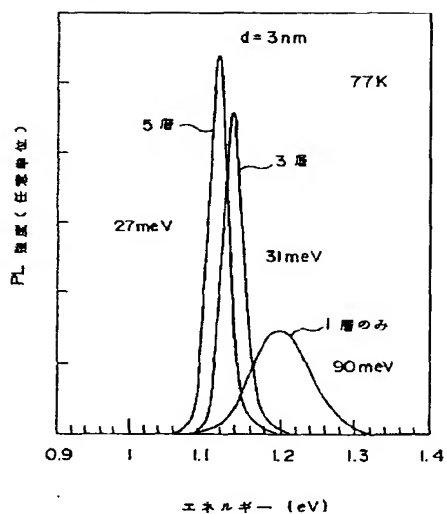


(A)

(B)

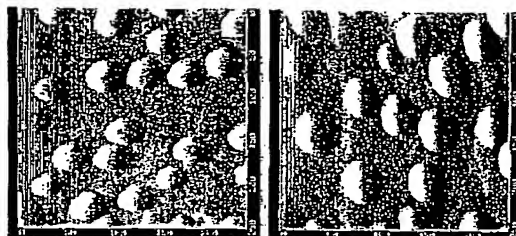
【図12】

垂直に整列した量子ドットのPLスペクトルを示す別の図



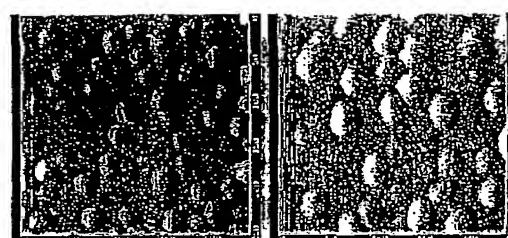
【図8】

中間層の厚さを10nmとした場合における積層の進行に伴う
量子ドット径および密度の変化を示すAFM写真の図



(C)

(D)

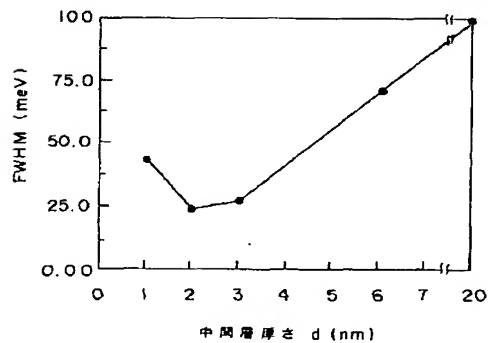


(A)

(B)

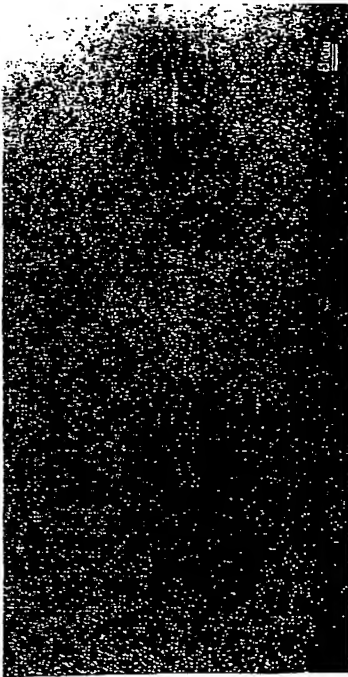
【図13】

中間層の厚さとPLスペクトルの鋭さの関係を示す図



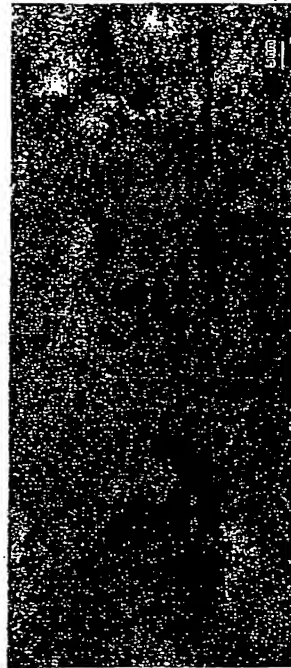
【図9】

中間層の厚さを2nmとした場合の量子ドットの
整列状態を示す断面TEM写真の図



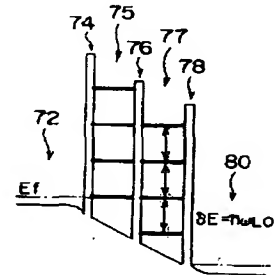
【図10】

中間層の厚さを3nmとした場合の量子ドットの
整列状態を示す断面TEM写真の図



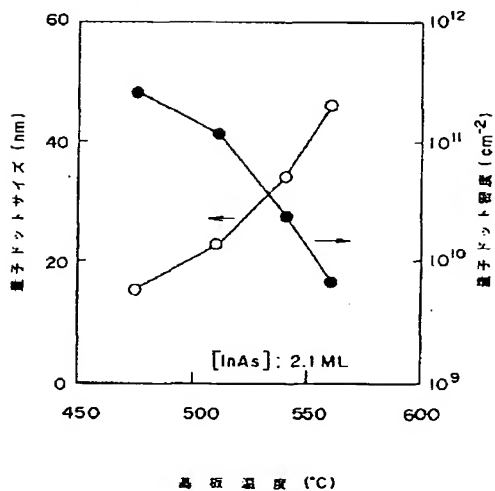
【図21】

図19の共振トンネルダイオードの動作原理を説明
するバンド構造図



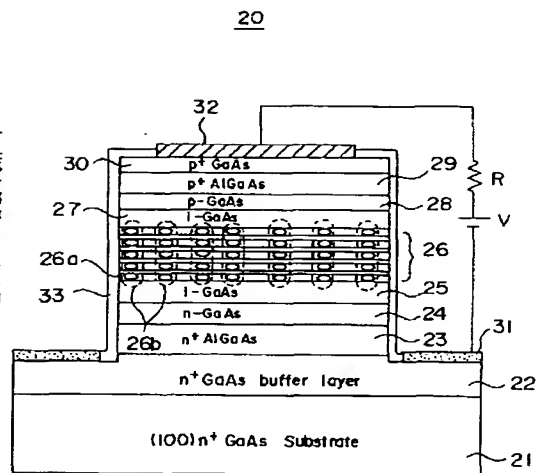
【図14】

堆積温度と量子ドットサイズおよび密度の関係を示す図



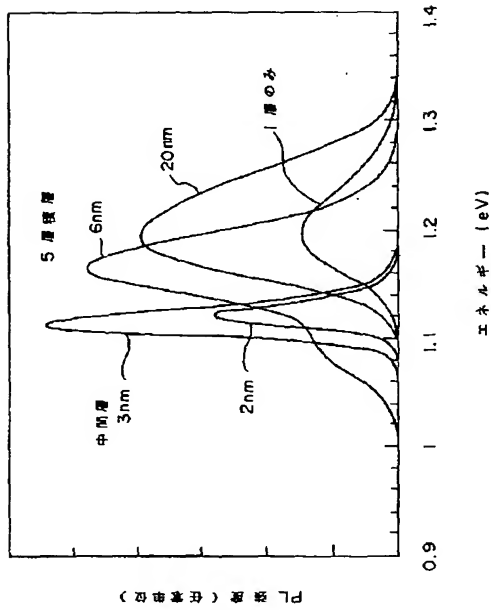
【図15】

本発明の第1実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図

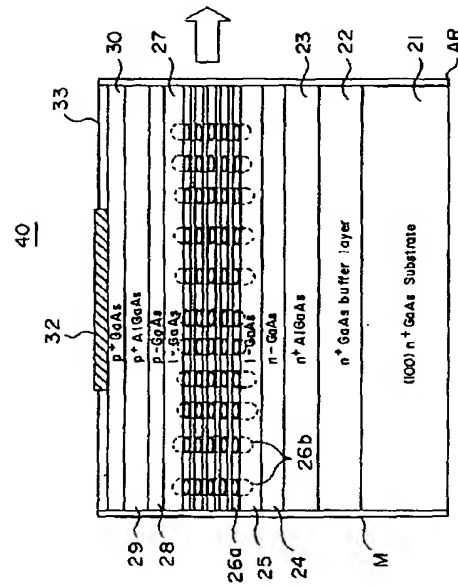


【図11】

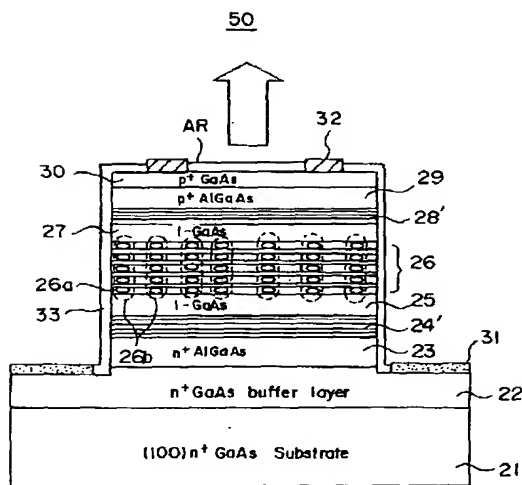
垂直に整列した量子ドットのPLスペクトルを示す図



【図16】

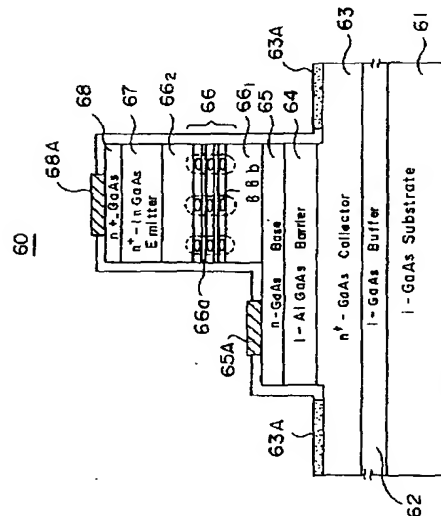
本発明の第2実施例による端面発光型
レーザダイオードの構成を示す断面図

【図17】

本発明の第3実施例による面発光型レー
ザダイオードの構成を示す断面図

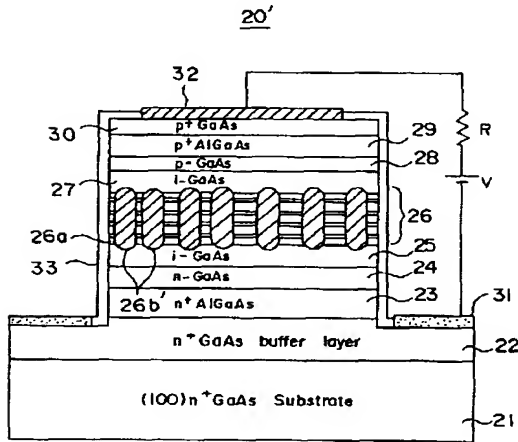
【図18】

本発明の第4実施例によるRHEETの構成を示す断面図



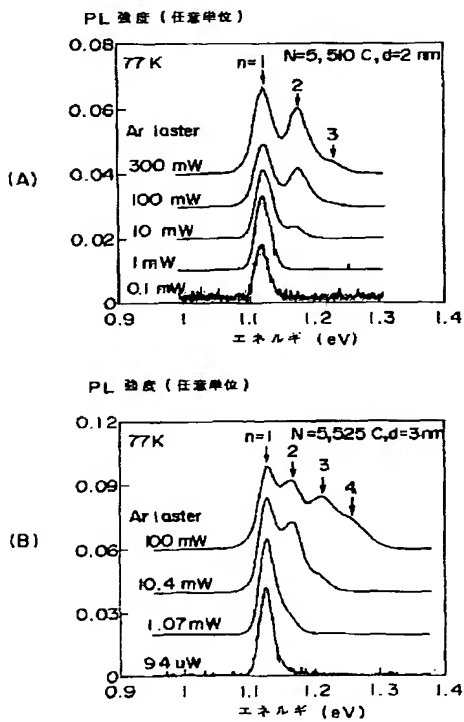
【図19】

本発明の第5実施例による発光ダイオードの構成を示す断面図

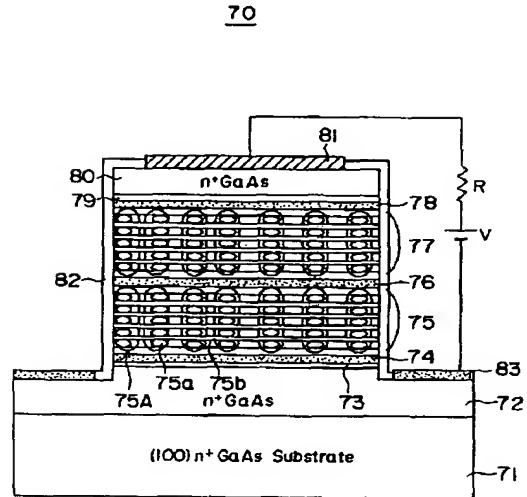


【図23】

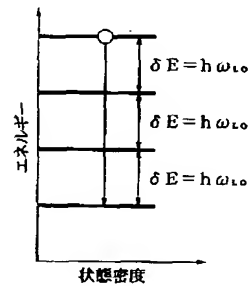
(A), (B)は堆積条件を変えて形成した積層量子構造のPLスペクトルを示す図



【図20】

本発明の第6実施例による
共鳴トンネルダイオードの構成を示す断面図

【図24】

本発明の積層量子構造における高次の励起状態
および状態間の遷移を促進する構造を示す図

フロントページの続き

(51) Int. Cl. 6

H 0 1 S 3/18

識別記号

庁内整理番号

F I

H 0 1 L 29/88

技術表示箇所

S